

SVILUPPO DI UN PROFILOMETRO LASER PER MISURE DI TESSITURA STRADALE E STUDIO DELLA CORRELAZIONE TRA TESSITURA E RUMORE DA ROTOLAMENTO

IMPLEMENTATION OF A LASER PROFILOMETER FOR ROAD TEXTURE MEASUREMENTS AND ITS CORRELATION WITH ROLLING NOISE

Alessandro Del Pizzo ¹ *, Francesco Bianco ², Luca Teti ², Antonino Moro ³, Gaetano Licitra ⁴

¹ Dipartimento di Fisica, Università di Pisa

² Ipool s.r.l.

³ IPCF CNR - Pisa

⁴ ARPAT Area Vasta Costa - Livorno

* Indirizzo dell'autore di riferimento - Corresponding author's address:
c/o Ipool srl Via Antonio Cocchi 7 - 56127, Pisa, Italia
e-mail: alessandro.delpizzo@df.unipi.it

(Ricevuto il 28/02/2018, accettato il 19/05/2018)

RIASSUNTO

Lo scopo del lavoro è stato quello di sviluppare un profilometro per misure di tessitura stradale, al fine di studiarne la correlazione con il rumore di rotolamento. Il software di analisi è basato su una procedura che permette anche una stima dell'incertezza di misura. Sono state analizzate misure di tessitura e di rumore ottenuto col metodo CPX su diversi tipi di pavimentazione, e sono stati studiati alcuni modelli, tenendo conto del concetto di tessitura efficace.

ABSTRACT

The purpose of this work was to develop a laser profilometer focused on the measurement of texture of road pavements, in order to study its correlation with rolling noise. The elaboration software is based on a procedure that yields information about uncertainties of measurements. The analysis has involved road texture measurements and rolling noise measured according to the CPX method on different pavements; several models have been studied, taking into account tyre envelopment of road texture.

Parole chiave: tessitura stradale; rumore da rotolamento; metodo CPX.

Keywords: road texture; rolling noise; CPX method.

1. Introduzione: generazione del rumore da rotolamento e sua connessione con la tessitura stradale

Il rumore stradale è una delle principali fonti di inquinamento acustico in ambito urbano, data la sua presenza diffusa in tutti gli ambienti antropizzati.

La generazione del rumore stradale è governata da tre meccanismi principali: l'unità motrice del veicolo, la sua aerodinamica ed infine l'interazione tra pneumatico e pavimentazione. Per gli autoveicoli, è noto che il rumore del motore è la sorgente principale di rumore fino alla velocità di circa 35 km/h, mentre per velocità più elevate il contributo dominante al rumore è dovuto proprio all'interazione pneumatico/pavimentazione [1]. I meccanismi di generazione del rumore da interazione pneumatico/pavimentazione dipendono fortemente dalle caratteristiche della superficie stradale [1].

1.1 Generazione del rumore stradale

I fenomeni alla base della generazione del rumore causato dall'interazione tra pneumatico e pavimentazione sono divisi in due categorie: fenomeni di vibrazione dello pneumatico e meccanismi aerodinamici [1].

Le vibrazioni dello pneumatico sono causate dalla presenza di irregolarità sulla superficie stradale, che deformano la superficie dello pneumatico, e dall'urto degli elementi del battistrada sulla superficie stradale. Le vibrazioni causano un rumore a bassa frequenza, che si estende fino a circa 1000 Hz.

Anche i modi di vibrazione toroidali dello pneumatico contribuiscono al rumore stradale [2]. La frequenza del modo fondamentale è di circa 250 Hz [2], mentre la prima armonica ha una frequenza di circa 500 Hz; l'analisi CPX pertanto permette di evidenziare soltanto la prima armonica e non il modo fondamentale, dato che l'analisi condotta copre le bande di terzi d'ottava tra 315 ed 8000 Hz.

Altri effetti connessi all'interazione diretta tra pneumatico e pavimentazione sono dovuti ai fenomeni di adesione e slittamento e sono noti come *stick and slip* e *stick and snap*: il primo meccanismo è causato dalla presenza di un moto relativo tra le due interfacce, mentre il secondo è dovuto ad un'eccessiva aderenza dello pneumatico alla pavimentazione [1].

Meccanismi aerodinamici di generazione del rumore sono dovuti alla compressione ed al successivo rilascio di aria intrappolata tra gli elementi del battistrada e la pavimentazione. Questo fenomeno, noto con il nome di *air pumping*, è il processo dominante nella generazione di rumore per frequenze maggiori di 1000 Hz [1].

Fenomeni di amplificazione, legati alla generazione di rumore per *air pumping*, sono le risonanze di Helmholtz dovute dell'aria all'interno delle cavità formate dal battistrada e l'effetto *horn*, così chiamato perché è causato da riflessioni multiple dei raggi sonori tra lo pneumatico e la superficie stradale, similmente a quanto accade in un corno [1].

1.2 Superficie stradale e misura della tessitura stradale

Una superficie stradale può essere descritta in termini di tessitura stradale, definita nella ISO 13473-2 come la deviazione della superficie reale da un piano di riferimento ideale [3], ed è causata dalla natura casuale della disposizione degli elementi che compongono la pavimentazione e dalla loro rugosità superficiale degli stessi [4].

Un profilo della superficie stradale $z(x)$ è definito dal contorno superiore di una sezione longitudinale della pavimentazione analizzata, ed è descritto mediante due coordinate: la prima è la distanza orizzontale, la seconda è l'altezza del profilo [4]. Un

profilometro è uno strumento in grado di rilevare l'altezza del profilo stradale, restituita come segnale in funzione della posizione orizzontale.

A seconda del principio di funzionamento, i profilometri sono divisi in due categorie: dispositivi a contatto, come ad esempio i profilometri ad ago, e dispositivi non a contatto, quali i sensori a triangolazione laser [4].

Il profilometro sviluppato ed utilizzato nel corso di questo lavoro è basato su un sensore a triangolazione laser ed un accelerometro piezoelettrico, solidale al sensore laser. I due dispositivi sono montati sul retro del veicolo, mentre un encoder angolare montato alla ruota posteriore sinistra permette di calcolare la distanza percorsa mediante la misura dell'angolo percorso dall'asse della ruota.

Lo strumento sviluppato e l'algoritmo di analisi dati permettono una misura del profilo stradale a velocità comprese tra i 30 e gli 80 km/h, con la possibilità di essere operativo senza causare intralci alla viabilità.

Dal profilo misurato, in fase di elaborazione dati in ambiente Matlab, è possibile ricavare una serie di indicatori riguardanti la tessitura stradale, come il *Mean Profile Depth* (MPD) e lo spettro di tessitura in bande di terzi d'ottava.

Il primo indicatore, il cui calcolo è basato sulla ISO 13473-1 [5], fornisce una valutazione della profondità media del profilo e si rivela utile per delimitare all'interno di una stessa misura sezioni di pavimentazione caratterizzate da omogeneità spaziale.

Lo spettro di tessitura in bande di terzi d'ottava è ottenuto effettuando un'analisi di Fourier sul profilo stradale misurato. Il codice di analisi dati effettua il calcolo dello spettro di tessitura a partire da una trasformata di Fourier (DFT) e sommando poi l'energia contenuta all'interno di una singola banda, secondo quanto prescritto dalla normativa ISO 13473-4 [6]. Il livello di tessitura L_{tx} all'interno di una data banda è solitamente espresso in dB, mediante la definizione [6]:

$$(1) \quad L_{tx} = 20 \log \frac{a}{a_0} \quad [\text{dB(A)}]$$

dove:

a è il valore RMS del segnale di tessitura all'interno della banda considerata;

a_0 è il valore di riferimento pari a 10^{-6} m.

1.3 Modellizzazione del rumore da rotolamento

Molti modelli ad oggi si basano sul lavoro di Sandberg et al [1], in cui vengono correlati i livelli di tessitura in banda d'ottava medi per varie pavimentazioni con livelli di rumore stradale per banda di terzi d'ottava misurati sulle stesse pavimentazioni. Il livello di rumore stimato a bordo strada dovuto all'interazione tra pneumatico e pavimentazione, per un veicolo in transito alla velocità di 80 km/h, viene espresso in funzione dei livelli di tessitura nelle bande d'ottava centrate a 5 mm ed 80 mm:

$$(2) \quad ERNL = 60 + 0.5L_{Tx,80} - 0.25L_{Tx,5} \quad [\text{dB(A)}]$$

dove:

$ERNL$ (Estimated Road Noisiness Level) è il rumore stradale stimato al passaggio di veicoli;

$L_{Tx,80}$ è il livello di tessitura nella banda d'ottava di 80 mm

$L_{Tx,5}$ è il livello di tessitura nella banda d'ottava di 5 mm

Un altro indicatore spettrale di cui si è studiata l'influenza sul rumore generato è il parametro di Huschek, definito come il rapporto tra il livello di tessitura tra 20 e 160 mm ed il livello nella banda d'ottava di 5 mm [7]:

$$(3) \quad \alpha_H = \frac{L_{Tx,20-160}}{L_{Tx,5}} \quad [-]$$

dove:

α_H è il parametro di Huschek;

$L_{Tx,20-160}$ è il livello di tessitura tra 20 e 160 mm

$L_{Tx,5}$ è il livello di tessitura nella banda d'ottava di 5 mm

Questo parametro, studiato da Losa et al. [8], è correlato al rumore prodotto su superfici stradali dense.

Una possibile asimmetria del profilo stradale non è evidenziata da una semplice analisi spettrale; si rende necessaria quindi la messa a punto di uno strumento capace di distinguere un profilo formato da picchi molto pronunciati, detto anche a tessitura positiva da uno costituito da valli profonde, ovvero a tessitura negativa.

Alcuni studi [8, 9, 10] hanno evidenziato infatti che la tessitura negativa risulta essere molto meno aggressiva da un punto di vista acustico rispetto a pavimentazioni a tessitura positiva, in quanto lo pneumatico non riesce a penetrare a fondo dentro la pavimentazione, causando, a parità di livello di tessitura, vibrazioni più contenute e creando una via di fuga per l'aria, riducendo l'incidenza di fenomeni aerodinamici. Per questo motivo, sono stati sviluppati diversi modelli che simulano la tessitura effettivamente vista dallo pneumatico, quali i modelli di Von Meier [9], Clapp e Klein-Hamet [10]

Lo studio della correlazione tra lo spettro di tessitura e lo spettro di rumore misurato secondo il metodo CPX è stato condotto tenendo in considerazione l'involuppo dello pneumatico sulla superficie stradale, secondo il metodo messo a punto da Von Meier. L'algoritmo è basato sulla limitazione della differenza seconda del segnale di tessitura, che non può quindi essere più grande di un valore soglia prefissato $d^* = 0.54 \text{ mm}^{-1}$, al fine di simulare l'interfaccia elastica dello pneumatico, deformata dall'interazione con la superficie stradale. Il risultato del calcolo è l'*involuppo di tessitura* realmente a contatto con lo pneumatico, ed è chiamato nel testo tessitura efficace (*enveloped texture* in inglese).

2. Misure di tessitura stradale

La tipologia di strumento sviluppato permette di effettuare i rilievi di profilo stradale senza la necessità di alterare la viabilità ordinaria. I possibili problemi causati dalla presenza di traffico stradale nel corso delle misure, quali eccessive accelerazioni e frenate sono quindi riconosciuti e scartati in fase di elaborazione dati.

2.1 Componenti hardware

L'hardware utilizzato nel corso delle misure consiste di:

- Sensore di profilo a triangolazione laser Gocator 1350;
- Accelerometro piezoelettrico B&K 4507;
- Encoder ELTRA EL63D10S;
- Modulo di acquisizione NI 9234 con scheda CDAQ 9171.

In figura 1b è raffigurato il montaggio del sensore laser all'interno della scatola di protezione, mentre in figura 1a è mostrato l'interno della scatola, con il laser e

l'accelerometro in posizione. L'interno della scatola contiene uno strato di materiale spugnoso per proteggere maggiormente il sistema da eventuali urti.

2.2 Acquisizione ed elaborazione dei dati

La misura del profilo stradale si basa su due diverse catene di acquisizione, gestite da due software in maniera indipendente. Il sensore laser, connesso tramite cavo ethernet ad un computer portatile, è gestito mediante l'interfaccia nativa e fornisce un segnale campionato ad una frequenza di 32 kHz. L'encoder angolare e l'accelerometro sono connessi alla scheda National Instruments, che a sua volta è connessa al notebook mediante porta USB e acquisiscono i dati ad una frequenza di 5120 Hz.

I segnali provenienti dall'accelerometro e dall'encoder sono acquisiti con un software dedicato e scritto in ambiente LabVIEW. L'encoder fornisce in uscita un'onda che presenta un gradino tra 0 e 5 V ogni 18°, mentre l'accelerometro fornisce un feedback passivo per il segnale di profilo verticale, e ne permette la sincronizzazione col segnale misurato dal sensore laser.

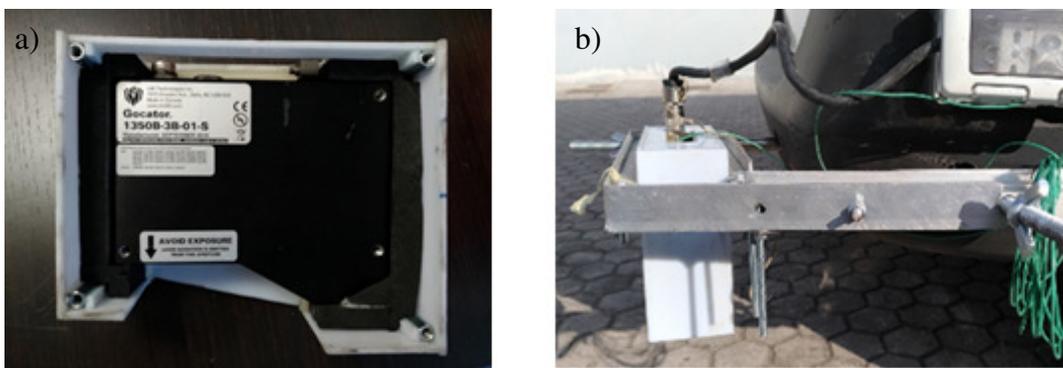


Figura 1 - Scatola contenente il sensore laser (a); Relativo fissaggio al veicolo (b) - encasing of the laser sensor (a); fastening of the sensor to the vehicle (b).

3. Procedura di calcolo dello spettro di tessitura e valutazione dell'incertezza

In fase di analisi, ogni profilo misurato è diviso in sezioni di lunghezza costante ed uguale a quella utilizzata per l'analisi dei dati di rumore secondo il metodo CPX, pari a 3 giri ruota, 5.84 m.

La lunghezza delle sezioni è scelta in modo da bilanciare due effetti contrastanti: aumentare la lunghezza delle sezioni ne diminuisce l'incertezza associata all'analisi spettrale [6], tuttavia, sezioni troppo lunghe potrebbero condurre ad una perdita di informazioni mascherando la variabilità spaziale del profilo, con conseguente difficoltà nell'individuazione delle corrette sezioni di pavimentazione su cui effettuare l'indagine.

La parte di segnale corrispondente ad una singola sezione viene suddivisa in 3 segmenti adiacenti, all'interno delle quali viene calcolato il livello di tessitura a partire dalla densità spettrale del segnale, sommando tutta l'energia contenuta all'interno di una singola banda.

Nell'ipotesi di segnale ergodico [10], è possibile utilizzare parametri statistici di una singola misura per stimare media e varianza della densità spettrale.

Dato che ciascun campione è composto da soltanto tre valori, viene utilizzata la statistica non parametrica; pertanto il valore associato alla densità spettrale della

k-esima banda è dato dalla mediana dei tre valori ottenuti nei segmenti, invece che dalla loro media aritmetica:

$$(4) \quad PSD_{sez}(k) \approx \text{median}(PSD_j(k)) \quad [\text{mm}^2/\text{m}^{-1}]$$

dove:

k è l'indice di banda di tessitura;

$PSD_{sez}(k)$ è la densità spettrale associata alla k-esima banda nella sezione;

$PSD_j(k)$ è la densità spettrale associata alla k-esima banda nel j-esimo segmento.

È noto altresì [11] che per un segnale gaussiano $z(x)$, avente larghezza di banda limitata, l'incertezza Δz_{rms}^2 associata al valore RMS misurato su un singolo segmento è stimato dalla formula:

$$(5) \quad \Delta z_{rms}^2 \approx \frac{\sigma^2\{z(x)\}}{\sqrt{\Delta k L}} \quad [\text{mm}^2/\text{m}^{-1}]$$

dove:

$\sigma^2\{z(x)\}$ è la varianza associata al processo casuale $z(x)$;

Δk è la larghezza di banda;

L è la lunghezza del profilo.

L'incertezza ΔPSD_{sez} associata al valor medio della densità spettrale di una sezione, all'interno della banda k-esima di larghezza Δk è quindi data da:

$$(6) \quad \Delta PSD_{sez}(k) \approx \frac{\sigma^2\{z_k(x)\}}{\sqrt{N \Delta k L_{seg}}} = \frac{\sigma^2\{z_k(x)\}}{\sqrt{3 \Delta k L_{seg}}} \quad [\text{mm}^2/\text{m}^{-1}]$$

dove:

$N = 3$ è il numero di segmenti che compongono una sezione;

L_{seg} è la lunghezza dei segmenti;

$\sigma^2\{z(x)\}$ e Δk assumono lo stesso significato visto in equazione (4).

Dato che il profilo $z(x)$ è un segnale filtrato in modo da avere media e pendenze nulle, la sua varianza all'interno di una banda è uguale al suo valore quadratico medio [11]:

$$(7) \quad \Delta PSD_{sez}(k) \approx \frac{PSD_{sez}(k)}{\sqrt{3 \Delta k L_{seg}}} \quad [\text{mm}^2/\text{m}^{-1}]$$

dove valgono le stesse notazioni delle formule precedenti.

Esprimendo l'incertezza associata alla densità spettrale in dB, si ottiene:

$$(8) \quad \Delta L_{tx}(\text{dB}, k) = 5 \log \left(\frac{1 + \frac{1}{\sqrt{3 \Delta k L_{sez}}}}{1 - \frac{1}{\sqrt{3 \Delta k L_{sez}}}} \right) \quad [\text{dB}]$$

dove:

$\Delta L_{tx}(\text{dB}, k)$ è l'incertezza espressa in dB associata alla k -esima banda dello spettro di tessitura;

Δk è la larghezza della banda;

L_{sez} è la lunghezza della sezione di pavimentazione esaminata.

In figura 2 si riporta l'andamento dell'incertezza fornita dall'equazione (8) per vari multipli della lunghezza di sezione $L_0 = 5.84$ m.

L'incertezza complessiva associata al valore medio dello spettro in terzi d'ottava di una pavimentazione è infine data dalla somma quadratica dell'incertezza di tipo B calcolata dall'equazione (8) e l'incertezza di tipo statistico uguale all'errore standard della media [12]:

$$(9) \quad u_{PSD;j} = k \sqrt{\Delta L_{tx}(\text{dB}, j)^2 + \frac{\sigma^2\{L_{tx}(j)\}}{N}} \quad [\text{dB}]$$

dove:

$u_{PSD;j}$ è l'incertezza associata alla densità spettrale nella banda j -esima;

k è il fattore di copertura, scelto pari a 1.96, a cui corrisponde un livello di confidenza pari al 95%;

N è il numero di sezioni in cui è stata divisa la pavimentazione;

$\sigma^2\{L_{tx}(j)\}$ è la varianza del livello di tessitura L_{tx} della banda j -esima di tutte le sezioni.

L'equazione (9) permette quindi di calcolare l'incertezza associata al valore medio dello spettro in terzi d'ottava di un profilo di tessitura stradale composto da un certo numero di sezioni adiacenti.

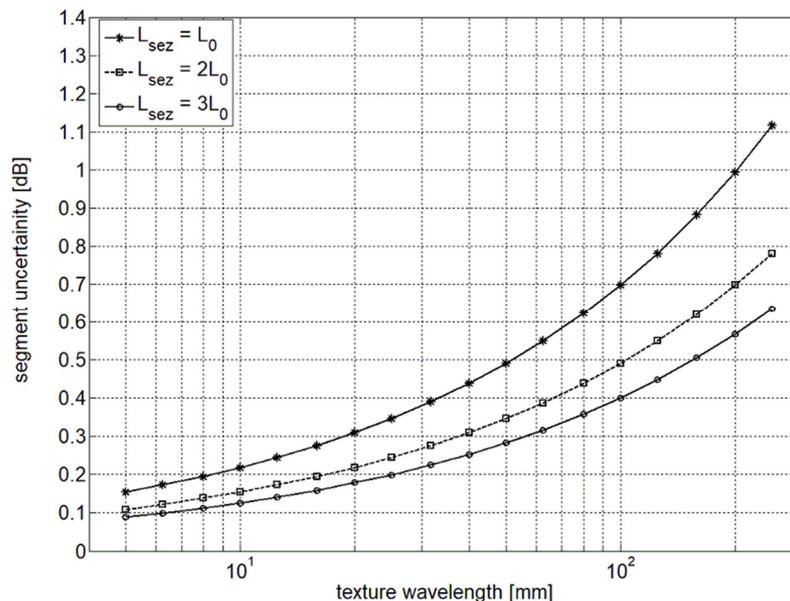


Figura 2 - Incertezza associata allo spettro di tessitura di una singola sezione per tre lunghezze diverse ($L_0 = 5.84$ m) - Segment uncertainties for three different segment lengths ($L_0 = 5.84$ m).

4. Valutazione del rumore da rotolamento secondo il metodo CPX

Il metodo di misura CPX (Close Proximity Index) è stato normato dalla ISO 11819-2 [13], e mira a valutare l'influenza delle pavimentazioni sul rumore stradale, nelle condizioni in cui il rumore da rotolamento risulta dominante, in quanto i microfoni sono posti vicino al pneumatico; infatti, nella configurazione tipica di misura, il rumore da rotolamento è il contributo dominante del rumore registrato dai microfoni. La metodologia adottata nel corso delle misure di rumore stradale è descritta da Licitra et al. [14]. Lo pneumatico utilizzato nel corso delle misure è il Michelin Energy Saver, pneumatico di riferimento della precedente versione della normativa.

Con riferimento alla figura 3, i due microfoni sono fissati ad una altezza h pari a 10 cm dal terreno, posti ad una distanza $B = 20$ cm dal centro della ruota e distanti $A = 20$ cm dal bordo esterno dello pneumatico [14].

All'interno di una sessione di misura, la pavimentazione da analizzare viene percorsa 10-15 volte a diverse velocità. Nella fase di elaborazione dati, al fine di migliorare la precisione del risultato, il livello di pressione associato all' i -esima sezione $L_p(i)$ viene eseguita una regressione del livello di rumore in funzione della velocità secondo la relazione logaritmica:

$$(10) \quad L_p(i) = A + B \log \frac{v_i}{v_0} \quad [\text{dB}]$$

dove:

$L_p(i)$ è il livello di pressione associato alla sezione i -esima;

A è il livello di pressione associato alla velocità di riferimento $v_0 = 50$ km/h;

v_i è la velocità di riferimento;

B è il coefficiente di velocità.

I risultati sono forniti con un intervallo di confidenza del 95%.

Il livello CPX medio associato ad ogni pavimentazione è dato dalla media pesata su tutte le sezioni che compongono la pavimentazione.

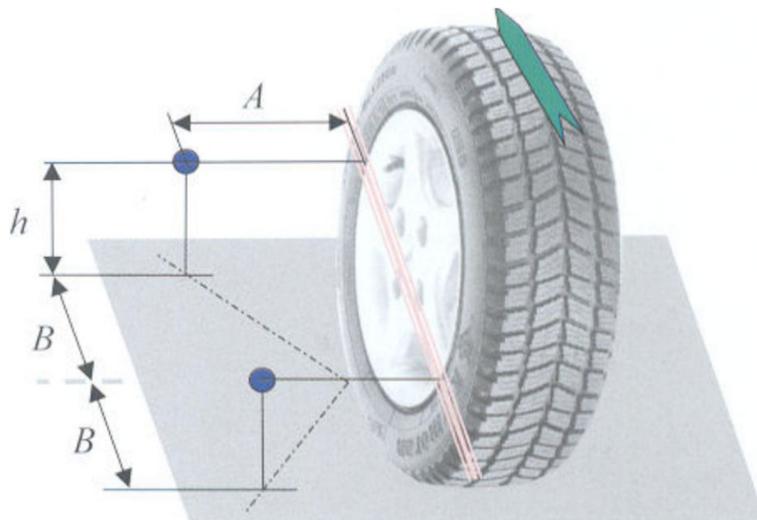


Figura 3 - posizione dei microfoni rispetto al pneumatico nel corso delle misure CPX - Position of microphones during CPX measurements.

5. Risultati

L'analisi della correlazione tra tessitura stradale e rumore prodotto dall'interazione tra pneumatico e pavimentazione è stata condotta in 13 siti, per un totale di 6 pavimentazioni diverse. Le misure di tessitura e rumore hanno avuto luogo nel corso della stessa sessione, per evitare effetti dovuti all'invecchiamento della pavimentazione. I siti analizzati sono stati indicizzati assegnando a ciascuno un codice in base alla posizione geografica; le 13 pavimentazioni analizzate sono state poi raggruppate in base alla loro tipologia (Tab. 1).

L'analisi è stata condotta alle velocità di 50 ed 80 km/h, in modo da studiare l'andamento delle correlazioni al variare della velocità.

Dapprima, è stato esaminato l'andamento del coefficiente di correlazione tra alcuni indici di tessitura, quali spettro di tessitura e MPD, e spettro CPX, ed in un secondo momento sono stati studiati sia l'adattamento del modello di Sandberg ai dati sperimentali, che la possibilità di sviluppare nuovi modelli a partire dalla relazione tra tessitura efficace e CPX e parametro di Huschek e CPX.

5.1 Correlazioni

Il coefficiente di correlazione tra lo spettro di tessitura efficace e lo spettro CPX è mostrato nelle figure 4a e 4b. Il metodo classico di rappresentare queste correlazioni è l'utilizzo di curve di isocorrelazione spettrale: lungo asse verticale sono riportate le frequenze centrali di bande in terzi d'ottava di misure CPX, mentre le ascisse rappresentano le lunghezze d'onda centrali delle bande in terze d'ottava del segnale di tessitura.

Tabella 1 - Elenco di siti di test - List of tested road sites.

<i>Sito</i>	<i>Codice pavimentazione</i>	<i>Data di misura [età in anni]</i>
Brunico (BZ)	B-1, B-2: IS	13/06/2017 [1.60]
Vandoies (BZ)	V-1, V-2: DR	13/06/2017 [1.60]
Terento (BZ)	T-1, T-2: AC12	13/06/2017 [1.60]
Rimini (RN)	RP-1, RP-2, RM-1, RM-2: DR	11/05/2017 [1.34]
Zola Predosa (BO)	Z-1: SMA 1.2 PFU; Z-2: SMA 0.75 PFU; Z-3: SMA	28/03/2017 [2.66]

Queste curve sono in accordo con le conoscenze teoriche riportate nelle sezioni precedenti: sia a 50 km/h che ad 80 km/h, si può notare una regione di forte correlazione positiva, nella regione tra 25 e 160 mm per rumore inferiore ai 400 Hz, mentre un'ampia zona di correlazione positiva, seppur meno forte della precedente, copre l'intervallo tra 16 e 250 mm, estendendosi fino a 1600 Hz per entrambe le velocità prese in esame.

La banda a 1600 Hz marca la linea di confine tra la zona a bassa frequenza dove i fenomeni di natura vibratoria sono dominanti e la zona ad alta frequenza, dove il rumore è generato da fenomeni di natura aerodinamica. La correlazione negativa occupa una stretta fascia che si estende da lunghezze d'onda corte fino a 6.5 mm. Uno degli aspetti più interessanti rilevabili in figura 4 è la banda CPX ad 80 km/h a 500 Hz a correlazione nulla, interpretabile come un indizio di un'armonica di un modo di risonanza dello pneumatico. Il fenomeno si evidenzia anche studiando l'andamento del coefficiente di correlazione tra spettro di tessitura e MPD, mostrato in figura 5a. Mentre in generale la

correlazione tra MPD e spettro CPX si mostra positiva per basse frequenze con un cambio di segno a 1600 Hz, ad 80 km/h mostra una bassa correlazione con la banda di 500 Hz.

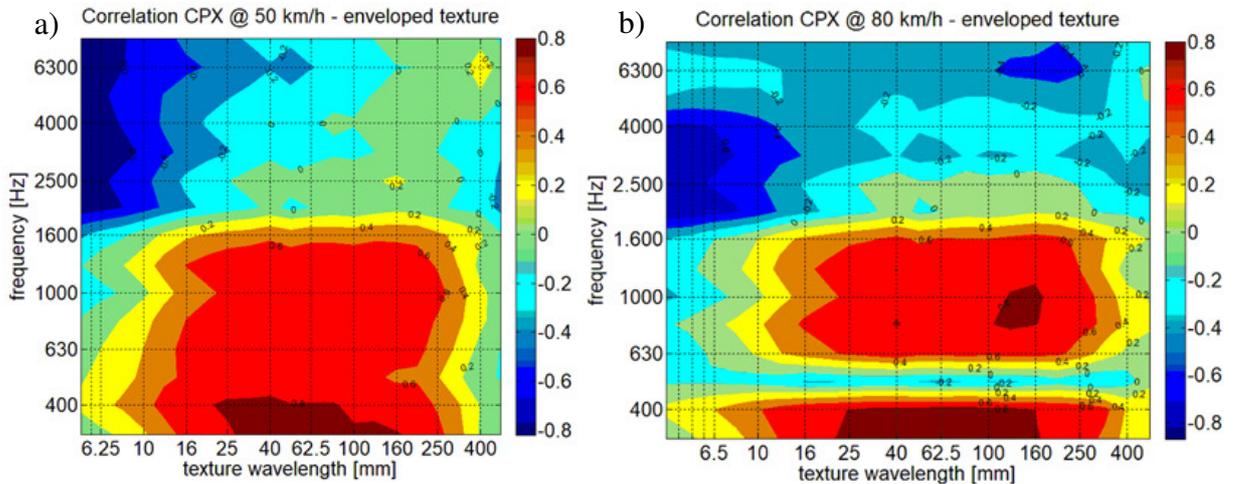


Figura 4 - Curve di isocorrelazione tra indice CPX e il livello di tessitura efficace a 50 km/h (a) ed 80 km/h (b) - Spectral isocorrelation curves between CPX and enveloped texture level at 50 km/h (a) and 80 km/h (b).

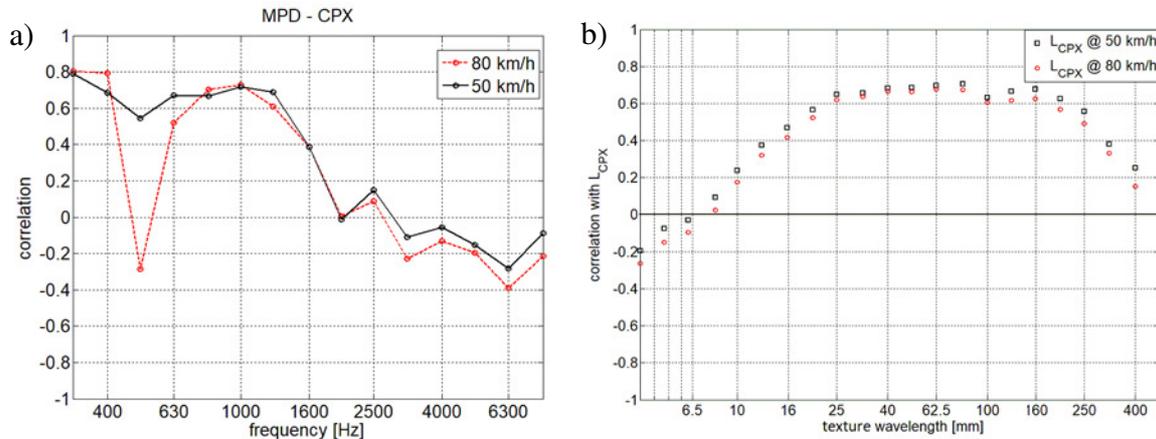


Figura 5 - Coefficiente di correlazione tra MPD e bande in terzi d'ottave del livello CPX (a) e correlazione tra livello CPX in banda larga e spettro di tessitura in bande di terzi d'ottave (b) - Correlation coefficient between MPD and CPX level in one-third octave bands (a) and correlation between CPX broadband levels and texture spectrum in one-third octave bands (b).

La visibilità della risonanza ad 80 km/h, ma non a 50 km/h, potrebbe indicare l'esistenza di una soglia oltre la quale lo pneumatico riceve abbastanza sollecitazioni da eccitare il modo vibrazionale. La relazione tra lunghezza d'onda λ e frequenza f del segnale di tessitura per uno pneumatico in rotolamento sulla pavimentazione a velocità v è data da: $f\lambda = v$, e pertanto, si può notare che la lunghezza d'onda associata alla banda di 500 Hz ad 80 km/h è pari a 44 mm, circa metà della lunghezza caratteristica

dell'interfaccia pneumatico/pavimentazione [1].

Il massimo della correlazione tra il livello CPX in banda larga e lo spettro di tessitura efficace in terzi d'ottava (Fig. 5b) si evidenzia, sia a 50 che ad 80 km/h, nella banda centrata in 80 mm, anche se la correlazione è positiva per l'intera fascia tra 16 e 250 mm.

Lunghezze d'onda corte, invece, sono negativamente correlate con il livello CPX in banda larga. Non si nota, inoltre, l'influenza della risonanza sul livello in banda larga: infatti, nonostante ad 80 km/h il valore dello spettro nella banda di 500 Hz sia fino a 10 dB più alto delle bande adiacenti, il suo contributo al livello complessivo si attesta su 1 dB(A), non alterando di fatto il valore delle correlazioni in banda larga.

5.2 Modellizzazione del rumore da rotolamento

Il modello di Sandberg in equazione (2) permette di prevedere il rumore dovuto all'interazione tra pneumatico e pavimentazione, per un veicolo in transito a 80 km/h, misurato a bordo strada a distanza di 7.5 m dal centro della corsia esaminata. Al fine di rendere paragonabili i valori ottenuti con il metodo CPX e quelli proposti in equazione (2), è necessario quindi inserire un termine correttivo. Nonostante non sia disponibile, ad oggi, una metodologia di conversione da livelli CPX a livelli misurati a bordo strada in bande di terzi d'ottava [15], Cesbron e Klein hanno suggerito [16], per valori in banda larga, la seguente relazione:

$$(11) \quad \Delta L = L_{Aeq} - L_{Amax} = 21.6 \pm 1.5 \quad [\text{dB}]$$

dove:

ΔL è il termine correttivo tra misure CPX e livelli misurati in Coast-By;

L_{Aeq} è il livello CPX in banda larga

L_{Amax} è il livello in banda larga misurato a bordo strada.

Tenendo conto del termine correttivo, l'equazione che descrive secondo il modello di Sandberg il legame tra lo spettro di tessitura e il livello CPX in banda larga è data da:

$$(12) \quad ECPXL = 81.6 + 0.5L_{Tx,80} - 0.25L_{Tx,5} \quad [\text{dB(A)}]$$

dove:

$ECPXL$ (Expected CPX level) è il livello CPX in banda larga calcolato;

$L_{Tx,80}$ ed $L_{Tx,5}$ assumono lo stesso significato visto in equazione (2).

L'equazione (12) non riesce tuttavia a descrivere adeguatamente la relazione tra rumore da rotolamento e tessitura stradale. Un confronto dei dati, riportati in figura 6, mostra che in generale i valori di rumore calcolati mediante equazione (12) si discostano di poco dai valori misurati, tuttavia il modello non riesce a prevedere alcuni andamenti al variare della tipologia di pavimentazione, come ad esempio la maggior rumorosità di DR rispetto a SMA 1.

La somma quadratica degli errori risulta essere pari a 2.45 dB(A), con un $r^2 = 0.32$, che indica una scarsa aderenza del modello ai dati sperimentali.

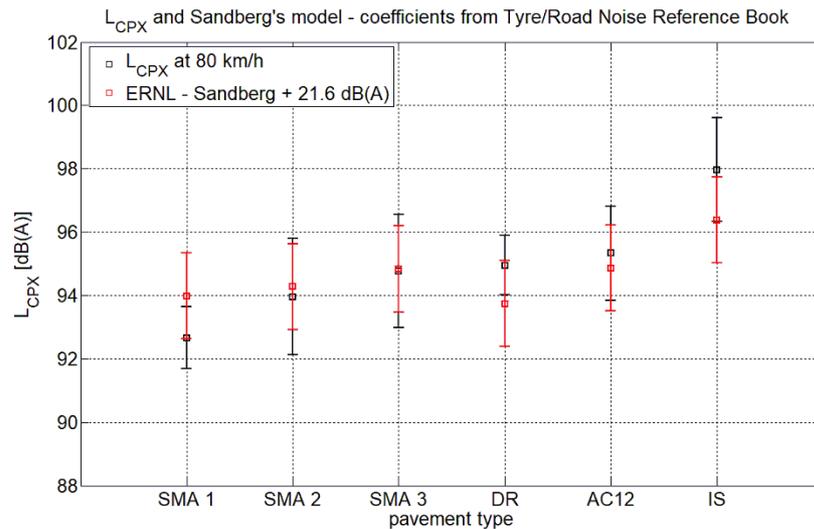


Figura 6 - Confronto tra livello CPX misurato e ECPXL ad 80 km/h con i coefficienti forniti da Sandberg [1] - Comparison between CPX level and ECPXL at 80 km/h with coefficients from Sandberg [1].

5.3 Modello basato su tessitura efficace

Dato lo scarso adattamento dei coefficienti del modello in equazione (12) ai dati sperimentali, è stato elaborato un nuovo modello basato sul precedente, che utilizza come ingresso lo spettro di tessitura efficace valutata con l'algoritmo proposto da Von Meier [9]. Il modello, pertanto, assume la seguente forma:

$$(13) \quad L_{CPX} = a_{80}L_{eTx,80} + a_5L_{eTx,5} + c \quad [\text{dB(A)}]$$

dove:

L_{CPX} è il livello CPX in banda larga

$L_{eTx,80}$ è il livello di tessitura efficace nella banda d'ottava centrata ad 80 mm;

$L_{eTx,5}$ è il livello di tessitura efficace nella banda d'ottava centrata a 5 mm;

a_{80} , a_5 , c sono i coefficienti della regressione.

La regressione è stata eseguita sia a 50 km/h che ad 80 km/h; i coefficienti ottenuti, assieme al valore RMSE e r^2 sono riportati in tabella 2.

Tabella 1 - Coefficienti della regressione di eq. (13) con intervalli di confidenza del 95% - Eq. (13) fit coefficients with 95% confidence bounds.

Parametro	Valore a 50 km/h	Valore ad 80 km/h
c	94.1 ± 1 dB(A)	99.3 ± 1 dB(A)
a_{80}	0.73 ± 0.02 dB(A)/dB	0.86 ± 0.02 dB(A)/dB
a_5	-0.86 ± 0.02 dB(A)/dB	-0.95 ± 0.02 dB(A)/dB
RMSE	0.25	0.37
r^2	0.98	0.96

Dato che sono state prese in considerazione soltanto due velocità, non è stato possibile verificare la dipendenza logaritmica del livello CPX e velocità del veicolo, come è stato fatto ad esempio da Losa et al. [8].

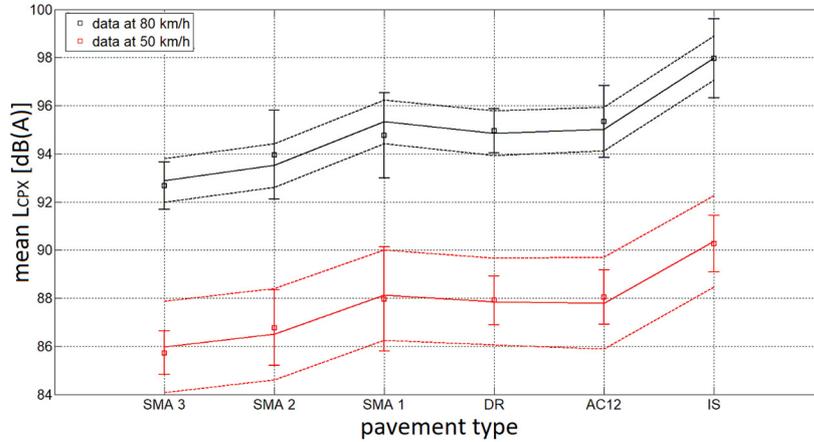


Fig. 7 – Confronto tra i dati sperimentali e la regressione di eq. (13) - Comparison of experimental data and expected values provided by eq. (13).

5.4 Parametro di Huschek

Il parametro di Huschek definito in equazione (3) è collegato ad alcune proprietà della pavimentazione, come ad esempio la resistenza allo slittamento [7, 8].

Data la dipendenza di questo parametro da due quantità correlate col rumore da rotolamento, è ragionevole supporre che anche questo parametro mostri un certo legame con il rumore da rotolamento [8]; pertanto è stata effettuata una regressione lineare tra il parametro di Huschek ed il livello CPX in banda larga secondo l'equazione:

$$(14) \quad L_{CPX} = a\alpha_H + b \quad [\text{dB(A)}]$$

dove:

L_{CPX} è il livello CPX in banda larga a 50 ed 80 km/h;

a e b sono i coefficienti del fit, diversi a 50 ed 80 km/h;

α_H è il parametro di Huschek definito dall'eq. (3).

I risultati della regressione sono riportati in tabella 2.

Tab. 2 – Coefficienti dell'equazione (14) con intervalli di confidenza del 95% - Fit coefficients of equation (14) with 95% confidence bounds

Parametro	Valore a 50 km/h	Valore ad 80 km/h
a	29 ± 3	33 ± 5
b	49 ± 2	51.7 ± 3
RMSE	0.17	0.17
r^2	0.99	0.26

Come si evince dalla figura 8, anche il parametro di Huschek può essere utilizzato per predire il rumore su pavimentazioni stradali dense.

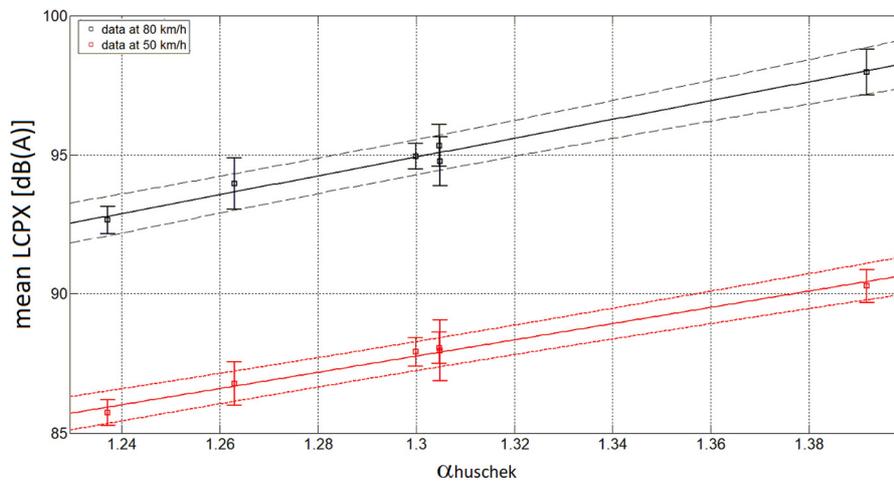


Fig. 8 – Livello CPX in banda larga in funzione del parametro di Huschek – CPX broadband level as a function of Huschek's parameter.

Conclusioni

Il lavoro è stato svolto al fine di costruire un profilometro laser per misure di tessitura stradale. La costruzione del profilometro ha interessato sia l'hardware, con la fase progettuale ed il conseguente montaggio del dispositivo sul veicolo, che l'elaborazione del software necessario per l'acquisizione e l'analisi dei dati. Le misure effettuate hanno permesso uno studio preliminare della correlazione tra rumore da rotolamento e tessitura stradale, basato sui dati misurati.

Sebbene uno studio onnicomprensivo non sia stato possibile, sono state ritrovate molte delle caratteristiche già analizzate in letteratura emergono. Lo scarso accordo sperimentale ottenuto utilizzando il modello di Sandberg può essere spiegato anche prendendo in considerazione la dipendenza del rumore dalla tipologia di pneumatico utilizzato; le correlazioni trovate sono tuttavia consistenti con i valori riportati in altri studi [1, 7]

Lo studio della correlazione tra tessitura e rumore da rotolamento è stata portata avanti in due fasi: dapprima, sono stati calcolati i coefficienti di correlazione tra parametri relativi alla tessitura e misure CPX effettuate a 50 km/h ed 80 km/h, e solo in una seconda fase è stato verificato il modello di Sandberg [1] ed è stato proposto un nuovo modello basato su livelli spettrali di tessitura efficace nelle bande d'ottava centrate in 80 mm ed in 5 mm. Un aumento del livello di tessitura efficace ad 80 mm conduce ad un aumento del livello CPX, mentre un aumento del livello di tessitura efficace a 5 mm causa una riduzione del rumore generato. Nonostante il modello riesca a descrivere bene la relazione tra i dati sperimentali, una sua validazione non è stata possibile, a causa dello scarso numero di pavimentazioni disponibili. Inoltre, sarebbe interessante valutare la stabilità temporale dei coefficienti del modello trovato.

Oltre allo studio su un campione più numeroso di tipologie di strade, potrebbe essere utile condurre un'analisi da svolgersi in sezioni, all'interno di uno stesso sito. Questa possibilità richiede tuttavia misure di rumore e tessitura eseguite in contemporanea.

Ai fini di ridurre l'incertezza associata alla misura del profilo, nonché per effettuare una più completa analisi dell'omogeneità spaziale della pavimentazione, sarebbe utile la costruzione di un sistema costituito da più sensori laser atti alla profilazione di linee adiacenti, in modo da avere più informazioni su tutta l'area di interazione tra pneumatico e pavimentazione. La descrizione di questa interazione potrebbe essere migliorata mediante l'implementazione di un modello fisico, basato sul lavoro di Hamet e Klein [10].

Questo lavoro, tuttavia, sottolinea nuovamente l'importanza della tessitura stradale nella generazione del rumore di rotolamento, suggerendo alcune caratteristiche di tessitura per pavimentazioni a basso impatto acustico.

Conclusions

This work was aimed at the construction of a laser profilometer for road texture measurements, in order to perform a preliminary study on the correlation between rolling noise and road texture based on measured data. The implementation of the profilometer was based on three distinct phases: selection of hardware components, design of the profilometer and implementation of the required software to acquire and analyse data.

Although a complete study has not been possible, this work highlights many of the features already available in literature. The poor fit of data performed by Sandberg's model could be explained by considering the dependence of rolling noise on tyre properties; however, the values of the correlation coefficient found are consistent with values available in literature [1, 7].

The study of the correlation between rolling noise and road texture was carried out in two different phases: at first, the main focus was the calculation of the correlation coefficient between several texture indices and CPX levels measured at 50 and 80 km/h; and, in a second moment, a verification of Sandberg's model [1] was performed, leading to the proposal of a new model based on enveloped texture capable of describing broadband CPX noise levels as a function of enveloped texture levels in the octave bands centred at 80 and 5 mm. An increase of texture levels at 80 mm leads to an increase of rolling noise, while increasing texture level at 5 mm causes a reduction of broadband noise. Despite the model fits well the experimental data, a validation of the model was not possible, due to the scarce number of different kinds of road surfaces available. Another important aspect that requires further evaluation is the temporal stability of the model coefficients.

Besides extending the study to a more numerous sample of types of road surfaces, an interesting study could be performed carrying out, on a certain number of sites, a section-per-section analysis. This possibility requires a simultaneous measurement of both signals.

In order to reduce uncertainty of spectral evaluation, and to perform a more complete analysis of the spatial homogeneity of the road surfaces, more laser sensors stacked one next to the other could be used for the measurement of adjacent profile lines; in this way, more information could be gathered about the whole area of interaction between road and tyre. The description of this interaction could be improved by the implementation of a physical model, based on the work of Hamet and Klein [10].

This work, however, underlines yet again the importance of road texture in the generation of rolling noise, and paves the way for further studies on the properties of low-noise road pavements.

Bibliografia

- [1] Sandberg, U., Ejsmont J.A. (2002). Tyre/road noise reference book, Informex, Kisa.
- [2] Masino, J., Pinay, J., Reischl, M., Gauterin, F. (2017). Road surface prediction from acoustical measurements in the tire cavity. *Applied Acoustics*, 125, pp. 41-48.
- [3] ISO (2002). ISO 13473-2: 2002 Characterization of pavement texture by use of surface profiles - Part 2: Terminology and basic requirements related to texture profile analysis. ISO, Geneva, Switzerland.
- [4] Localzo, A. (2008). Misura e caratterizzazione della regolarità in ambito urbano, ed in particolare per le pavimentazioni lapidee della città di Napoli. Tesi di Dottorato di ricerca in Ingegneria dei Sistemi Idraulici di Trasporto e Territoriali. Università di Napoli Federico II.
- [5] ISO (1997). ISO 13473-1:1997 Characterization of pavement texture by use of surface profiles - Part 1: Determination of Mean Profile Depth. ISO, Geneva, Switzerland.
- [6] ISO (2004). ISO 13473-4:2004 Characterization of pavement texture by use of surface profiles - Part 4: Spectral analysis of texture profiles. ISO, Geneva, Switzerland.
- [7] Huschek S. (1996). Characterization of pavement surface texture and its influence on tire/road noise. In: *Atti del Convegno International Symposium on Pavement Surface Characteristics*, Christchurch, 3-4 settembre, pp. 301-318.
- [8] Losa, M., Leandri, P., Bacci, R. (2010). Empirical Rolling Noise Prediction Models Based on Pavement Surface Characteristics. *Road Materials and Pavement Design*, 11, suppl. 1, pp. 487-506.
- [9] Von Meier, A., Van Blokland, G.J., Descornet, G. (1992). The influence of texture and sound absorption on the noise of porous road surfaces. In: *PIARC 2nd International Symposium on Road Surface Characteristics*, pp. 7-19.
- [10] Klein, P., Hamet, J.F. (2004). Road texture and rolling noise: an envelopment procedure for tire-road contact. *Rapport de recherche*. 17p. <hal-00546120>, HAL archives ouvertes.
- [11] Bendat, J.S., Piersol, A.G. (2000). *Random data: Analysis and Measurement Procedures*. Third Edition, John Wiley & Sons.
- [12] JCGM 100 (2008). *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*.
- [13] UNI (2017). UNI EN ISO 11819-2:2017, Acustica - Misurazione dell'influenza delle superfici stradali sul rumore da traffico - Parte 2: Metodo per la misura del rumore di rotolamento in prossimità del pneumatico.
- [14] Licitra, G., Teti, L., Cerchiai, M. (2014). A modified Close Proximity method to evaluate the time trends of road pavements acoustical performances. *Applied Acoustics*, 76, pp. 169-179.
- [15] Licitra, G., Cerchiai, M., Teti, L., Bianco, F., Chetoni, M., Ascari, E. (2016). Relationship between Pass By results, CPX ones and roadside long-term measurements: some considerations. In: *Atti del Convegno INTER-NOISE 2016*, Hamburg, 21-24 agosto, pp. 4955-4963.
- [16] Cesbron, J., Klein, P. (2017). Correlation between tyre/road noise levels measured by the Coast-By and the Close ProXimity methods. *Applied Acoustics*, 126, pp. 36-46.